

# 流域水文气象耦合的洪水预报研究及应用进展

彭涛<sup>1</sup> 沈铁元<sup>1</sup> 高玉芳<sup>2</sup> 胡跃文<sup>3</sup>

(1 中国气象局武汉暴雨研究所 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430074; 2 江苏省农业气象重点实验室/应用气象学院, 南京信息工程大学, 南京 210044; 3 贵州省气象服务中心, 贵阳 550002)

**摘要:** 洪水预报在防洪减灾中具有重要的理论意义和现实意义。论文从流域暴雨的定量降水估算与预报、流域洪水预报水文模型、流域水文气象耦合、流域洪水实时预报系统研发及业务应用等方面回顾了国内外流域水文气象耦合的洪水预报研究与实践的进展, 并从洪水预报与气象预报的集成耦合、有物理基础的分布式水文模拟、洪水风险灾害评价等展望了流域洪水灾害预报的一些关键技术和问题。

**关键词:** 暴雨洪水, 洪水预报, 水文气象耦合

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.02.006

## Research and Application Progress on Basin Hydro-Meteorology Coupling Flood Forecasting

Peng Tao<sup>1</sup>, Shen Tiejuan<sup>1</sup>, Gao Yufang<sup>2</sup>, Hu Yuewen<sup>3</sup>

1 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074

2 Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology/College of Applied Meteorology, Nanjing University of information Science and Technology, Nanjing 210044

3 Guizhou Province Meteorological Service Center, Guiyang 550002

**Abstract:** Flood forecasting has an important theoretical and practical significance in flood control and disaster mitigation. Research and application progress on Basin hydro-meteorology coupling flood forecasting both at home and abroad is reviewed from the radar and numerical model of quantitative precipitation estimation and forecast technology, hydrological model for basin flood forecasting, hydrology-meteorological coupling technology, and real-time flood forecasting system. Finally, some key technologies and problems of flood disaster prediction from the integration and coupling for flood forecast and weather forecast, physically based distributed hydrological model and flood disaster evaluation are proposed.

**Keywords:** storm flood, flood forecasting, hydrological and meteorological coupling

### 1 引言

我国的洪涝灾害从出现频率、影响范围到造成的损失都是世界最为严重的国家之一。据统计, 在过去的2000多年中, 中国发生的有史料可查的重大洪水灾害就达1600余次<sup>[1-2]</sup>。20世纪50年代以来, 长江流域(包括江淮地区)的历次大洪水(如1954、1969、1975、1991、1993、1994、1995、1996、1998、2003、2007、2010和2011年)都给国家造成了巨大损

失。新中国成立以来, 经过40多年的治理, 全国江河流域的防洪形势有了重大改观。近年来, 随着人口的持续增长和经济的迅猛发展, 我国洪涝损失具有逐年增大的趋势。如何对洪水进行科学而准确的预报, 一直是人类长期面临的历史课题。

洪水预报追求的是高精度和预见期长, 要得到高精度和长预见期预报, 必须从提高降雨估算精度开始, 结合降雨预报, 采取流域降雨径流模型和河道洪水演算模型的途径来实现。

早在30多年前, 陈金荣等<sup>[3]</sup>从长江流域防洪的丰富实践中, 对水文气象预报已作了精辟而深刻的论述, 指出气象预报同水文预报的结合为防洪和水库调度等工作, 带来巨大的优越性和必要性, 是水文预报发展的必然趋势。文中阐述的基本思想在水文气象预报技术已有许多新的发展和进步的今天, 仍然具有指

收稿日期: 2013年9月24日; 修回日期: 2014年1月16日  
第一作者: 彭涛(1980—), Email: pt\_mail@sohu.com  
资助信息: 国家自然科学基金(41205086, 41105077); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306056, GYHY201306059); 江苏省自然科学基金面上项目(BK2012859)

导意义。

20世纪90年代以来,随着计算机网络、GIS、遥感、数值天气预报等现代技术在水文预报领域的推广应用,以及水文理论和方法的不断发展,当前基于雷达和数值模式的定量降水估算与预报技术、基于DEM的分布式水文模型研发、基于水文气象耦合的洪水预报、洪水实时预报系统的研发等正成为当前流域暴雨洪水预报技术研究和发展的方向。在此从流域暴雨的定量降水估算与预报、流域洪水预报模型、流域水文气象耦合、流域洪水实时预报系统研发及业务应用等几个方面围绕“水文气象耦合的洪水预报”这一核心对国内外相关研究及实践进展进行详细的回顾。

## 2 流域暴雨的定量降水估算与预报

洪水灾害产生的直接原因是定量级的降水,面雨量是一切洪水预报模型的输入场,所以,面雨量估算以及预报也成为目前国内外的一个研究热点。国内外专家做了大量的有益探索,如以泰森多边形法、Kriging插值为代表的实况插值法等,在此笔者将简要回顾基于雷达等遥感手段的定量降水估算以及基于数值模式的定量降水预报方面的进展<sup>[4]</sup>。

### 2.1 基于卫星、雷达等遥感手段的定量降水估算

利用卫星遥感资料估算降水,具有覆盖范围广、获得资料容易的优点,但是其空间分辨率不高,星下点的最高分辨率也只有5km,能从静止卫星收到的资料时间间隔一般是1h一幅图,另外所利用的卫星遥感资料主要反映的是云的情况,它与具体到某一点、某一小区域的降水无必然联系,缺乏一定的理论依据,但是随着静止卫星时空分辨率的提高,也逐步引起了专家学者的关注。

雷达等遥感估算降水有时空分辨率高的优点,可以比较客观地反映降水量相对大小的分布趋势。目前在天气雷达资料的面雨量估算以及融合技术方面,欧美国处于领先水平。如英国天气雷达网自20世纪70年代开始兴建,在80年代迅速发展,1993年基本达到目前的状态,主要由英国气象局管理的13部天气雷达组成的雷达监测网常年连续运行,以5min间隔实时提供2km×2km分辨率的降水率资料,以及每30min提供一次基于雷达观测资料外推制作的6h逐时和累计降水预报资料。美国自80年代后期开始建设新一代天气雷达网。用于全国布网的新一代雷达系统(WSR88D)是具有高质量定量降水探测能力的现代多普勒天气雷达。至1997年底,新雷达已在全国安装了165部,覆盖了全美国,能够提供时段小至5min和空间分辨率小于1km<sup>2</sup>的雨量估计值<sup>[5-6]</sup>。

我国从20世纪60年代开始布设天气雷达,目前我国建成了由172部新一代多普勒天气雷达组成的雷达观测网,实现6min一次的数据实时传输和拼图联网,加强暴雨等突发性灾害天气的监测预警服务。从80年代起开始研究雷达测雨和卫星测雨,并取得了很大的进展,如1998年淮河水利委员会与南京大学合作,以淮河为试验基地,利用安徽阜阳和合肥多普勒雷达在淮河流域的支流济、史、灌河流域进行试验研究。中国气象局和水利部联合进行的“淮河黄河流域暴雨洪水监测预报系统”试验项目中,对雷达和雨量计联合测量实时降水进行了业务试运行。此外就雷达估测降水方法而言,主要包括:Z-R关系法、平均校准法、卡尔曼滤波校准法、最优插值法、卡尔曼滤波和最优插值联合校准法等。国内大量学者对此也展开了大量研究:万玉发等<sup>[7]</sup>提出了一种基于准同雨团样本概念雷达与雨量计的实时同步结合的降雨估算新技术。尹忠海等<sup>[8]</sup>根据卡尔曼滤波校准方法估算区域降水量的原理,利用野外观测资料对一次降水过程进行了试验研究,结果表明卡尔曼滤波校准方法能提高雷达定量估算区域降水量的精度。李建通等<sup>[9]</sup>将最优插值法引进雷达测雨领域,并通过数值模拟和实测资料分析证明了该法在测定区域降水量方面的较好效果。刘晓阳等<sup>[10]</sup>用最优插值方法获得雷达雨量计联合估测的梅山水库集水区降水分布。张亚萍等<sup>[11]</sup>也在开展了大量雷达估测降雨的研究工作,并取得了较大的进展。

### 2.2 基于数值模式的定量降水预报

数值天气预报(NWP)是目前定量降雨预报最行之有效的一种方法。数值天气预报模式研究开始于50年前,目前国际上比较先进的数值天气预报模式有ECMWF(欧洲中期预报中心)的全球模式,NCEP(美国国家环境预报中心)的Eta模式、WRF、美国宾夕法尼亚州立大学和美国大气研究中心联合开发的中尺度数值预报模式MM5,以及日本全球模式、亚洲区域模式、日本区域模式等<sup>[12]</sup>。

我国的数值预报研究始于20世纪70年代,多以引进吸收国外模式为主。如张玉玲等发展的有限区域分析预报系统(LAFS),国家气象中心引进欧洲气象中心T639发展的T213等。另外,Eta、MM5、WRF等模式被我国学者引进并开展了大量应用研究<sup>[12-13]</sup>。我国自行研发的模式有:周晓平的5层细网格原始方程降水预报模式、宇如聪等发展的AREM,以及中国气象科学研究院在借鉴美国MM5和WRF的基础上研究开发的天气模式GRAPES。目前我国NWP整体水平与欧美等发达国家还存在一定的差距。目前我国QPF预

报水平逐年提升、空间分辨率越来越高,有限区域细网格业务化模式网格距已达10km左右。随着中国气象局精细化预报服务工作的开展,七大区域中心已建立了高分辨率的区域精细化预报业务系统,如华中区域气象中心由中国气象局武汉暴雨研究所(以下简称“暴雨所”)基于WRF模式搭建的3km×3km格距的区域精细化预报系统;王晨稀等<sup>[14]</sup>开展了我国集合预报的先例,探讨NWM的不确定性;李俊等<sup>[15]</sup>探讨了集合预报方法在山洪预报中应用。

### 3 流域洪水预报模型

流域洪水预报主要方法有两大类:一是以历史数据为基础的统计预报,该方法利用输入(一般指降雨量或上游干支流来水)与输出(一般指流域控制断面流量)资料,建立某种数学关系;然后就可由新的输入推测输出。这种模型只关心模拟的精度,而不考虑输入输出之间的物理因果关系。二是以水文模型为核心的定量洪水预报,该方法建立气象与水文因子的关系,依据气象要素进行水文预报。基于水文模型的洪水预报可分为概念性水文模型和分布式水文模型,概念性模型是以水文现象的物理概念作为基础进行模拟,对下渗、蒸发、产汇流等物理现象进行了合理概念化,具有一定的物理基础,因此,在近几十年里发展很快,在实际应用中得到了大量的使用。很多流域水文模型都属于概念性水文模型,如由Craford和Linsley提出的斯坦福模型,美国天气局Sitten提出的API模型,国内由赵人俊教授提出的新安江模型,意大利Todini提出的Arno模型等<sup>[16]</sup>。这些模型目前仍然是主流的洪水预报模型,在一定时期内还会继续发挥作用。从20世纪90年代中期以来,随着卫星遥感、数字雷达测雨技术以GIS技术的完善和高速发展并进入科技领域,分布式水文模型作为一类新的流域水文模型得到了快速发展,成为近20年来水文建模领域的热点、是水文模型的发展趋势和研究前沿<sup>[16-17]</sup>。

美国国家海洋和大气管理局(NOAA)于2000年9月开始主持实施“国际分布水文模型比较计划(DMIP)”,提出了全分布水文模型和半分布水文模型共12个,分析了概念性水文模型与分布水文模型的差别<sup>[18]</sup>。分布式流域水文模型最显著的特点是与DEM的结合,以偏微分方程控制基于物理过程的水文循环时空变化,能更好地考虑到降水和下垫面的空间变异,更好地利用GIS和遥感信息模拟降水径流响应,并能与气象模式结合延长洪水预见期。分布式水文模型的研究可以认为起始于1969年Freeze等发表的《一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝

图》的文章<sup>[19]</sup>,该文提出了分布式水文物理模型的基本概念和框架。被认为是第一个真正的分布式水文物理模型是SHE(Système Hydrologique Européen)。该模型由英国、法国和丹麦的科学家于1976年开始联合研制,于1982年正式发表。伴随着SHE的问世,分布式水文模型的研究得到了长足的发展,自20世纪90年代以来,国内外在水文模型模拟研究方面取得了新的进展,目前分布式水文模型的理论和技术已趋于成熟,国外代表性成果包括TOPMODEL(Topography Based Hydrological Model)、SWAT(Soil and Water Assessment Tool)、VIC(Variable Infiltration Capacity)等模型,可以说在对不同尺度、不同环境、不同需求的模拟应用中各有优势或缺陷<sup>[17-18]</sup>。

国内分布式水文模型的研究起步较晚。20世纪90年代以来,随着GIS软件的迅速发展,在国家自然科学基金的支持下,我国一些学者进行了探索性的研究工作。尽管起步较晚,但也取得了较大的进展。沈晓东等<sup>[20]</sup>在研究降雨时空与下垫面自然地理参数空间分布的不均匀性对径流过程影响的基础上,提出了一种在GIS支持下的动态分布降雨径流流域模型,实现了基于栅格DEM的坡面产汇流与河道汇流的数值模拟;郭生练等<sup>[21]</sup>建立了一个基于DEM的分布式流域水文物理模型,用来模拟小流域的降雨径流时空变化过程;任立良等<sup>[22]</sup>在数字高程模型(DEM)的基础上,进行子流域集水单元勾画、河网生成、河网与子流域编码及河网结构拓扑关系建立,然后在每一集水单元上建立数字产流模型,再根据河网结构拓扑关系建立数字河网汇流模型(马斯京根法),从而建成数字水文模型;郑红星等<sup>[23]</sup>提出了模块化结构的流域分布式水循环模拟系统(HIMS)等。

## 4 流域水文气象耦合关键技术

### 4.1 流域水文气象耦合的降水降尺度技术

数值天气预报模式与流域水文模型在时间空间分辨率存在的差异制约了天气预报模式预报结果在水文预报中应用的进一步发展。立足于在水文预报中充分地利用天气预报及气象信息这一目的,建立定量降水估算、定量降水预报(QPE/QPF)与水文模型(HM)之间的结合,其首要任务就是解决降水信息场与水文模型时间和空间尺度上的匹配问题,缩小两者的尺度差异,寻找水文气象结合的契机。目前这方面的研究工作目前已开始得到了相关学者的重视:刘勇等<sup>[24]</sup>充分利用降水量空间统计分析的结果,通过在模型中引入坡度、坡向变量,对祁连山中东部地区降水量空间变化模式进行尺度下移,得到了该地区具

有多尺度特性的高空间分辨率降水量的分析模型；此外，数值模式的自嵌套技术以及多模式的互嵌套技术开始用于提高模式空间分辨率<sup>[25]</sup>。为了有效地提高定量降水估算预报产品在水文预报中的应用，武汉暴雨所等单位从“雷达资料同化+模式嵌套+高分辨的区域数值模式+动力释用技术”的角度全面、系统地开展降尺度方法研究：在观测降水上基于新一代多普勒雷达探测技术和雨量计实测资料，采用卡尔曼滤波、最优插值、变分、统计权重等多种校正方法，研发了高分辨的定量降水估算校正新技术；在数值模式预报降水上通过资料同化、模式嵌套、动力释用等技术缩小了天气模式与水文模型网格尺度的差异<sup>[26]</sup>，建立了华中区域精细化数值预报系统（图1），发展了实时洪水预报中水文气象耦合的降尺度技术。

#### 4.2 雷达定量降水估算（QPE）与洪水预报的耦合

确切地掌握降雨量的空间分布，是使用分布式水文模型的重要先决条件。雷达测雨可直接测得降雨的空间分布，提供流域或区域的面雨量，并具有实时跟踪暴雨中心走向和暴雨空间变化的能力。雷达估算降水有时空分辨率高的优点，可以比较客观地反映降水量相对大小的分布趋势。

为了将雷达测雨资料用于洪水预报预警，国外学者首先展开了相关研究<sup>[5-6]</sup>。如美国已经建立了由多探测器降水估算技术和人机交互雨量订正技术共同构成的定量估算降水业务应用系统，并和水文预报模型结合，应用在山洪指导系统（FFGS）和美国天气局河流预报系统（NWSRFS）中。英国气象局开发了雷达资料实时处理和多部雷达联网工作，实现资料的实时质量控制，结合雷达和卫星资料，进行了气象和水文服务的短时定量降水预报，利用水文雷达系统（HYRAD）集成了雷达-雨量计估算面雨量和流域雷达降水预报的研究成果，用实时雷达和雨量计资料计算流域面雨量并进行未来两小时的流域面平均雨量预报，将计算和预报数据以时间序列的形式存入RFFS数

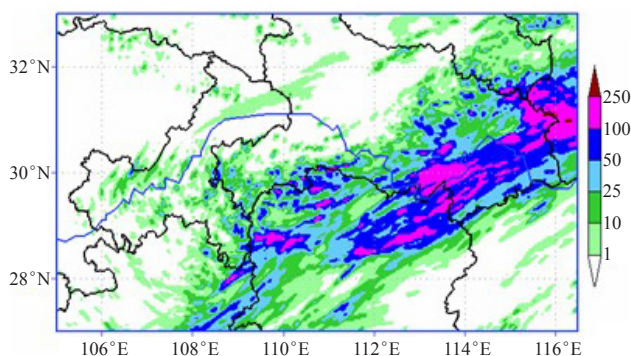


图1 3km分辨率的华中区域数值模式降水预报系统

据库用于河流预报。RFFS与HYRAD共同组成了实时降水与河流预报系统，目前正在泰晤士流域等几个洪水预报警报中心进行日常业务应用。意大利博洛尼亚（Bologna）大学开发的RAIN-MUSIC软件，能实现多源降雨信息同化和数据融合，可以作为利用雷达和卫星提供一个为得到足够准确的降雨监测预报和面雨量估算值的最好途径，该功能模块已纳入欧洲洪水预报系统（EFFORTS）中，显著提高了降雨估算的质量。

此外，国内有关学者也开始了定量降水估算和洪水预报耦合技术的研究探讨：刘黎平等<sup>[27]</sup>成功地应用天气雷达估算降雨技术来进行水文预报，提高了预报的精度；刘晓阳等<sup>[28]</sup>利用雷达估测降雨对史灌河流域进行了径流模拟；Ren等<sup>[29]</sup>、Chen等<sup>[30]</sup>利用雷达降雨资料对水文过程进行了模拟研究；李致家等<sup>[31]</sup>对从实时洪水预报的角度出发，将雷达遥感数据与水文模型进行耦合对淮河流域史灌河流域蒋家集站进行洪水预报；武汉暴雨所联合武汉大学<sup>[32-33]</sup>通过输入不同的降雨量估算结果（常规插值法得到面降雨量、雷达资料联合地面雨量站估算得到的降雨量）对比分析利用雷达资料联合雨量站估算得到的降雨量对洪水预报结果的影响，试验表明，综合平均确定性系数、预报洪峰流量合格率、峰现时差三个评价指标可以看出使用校准后的雷达降雨结果作为水文模型的输入总体洪水模拟水平是最优的。并基于水文模型，引进增长繁殖模方法对雷达QPE初值进行扰动，得到不同的QPE产品，从而输入水文模型，分析降水误差信息对洪水预报中径流模拟的影响，结果表明降水初始场经过随机扰动之后输出结果与未扰动的输出结果的相对误差有所增大，其中洪峰流量增大5%、洪量增大8%，即模型输入误差在经过模型的传递后有增大的趋势，而且峰现时间大部分会呈现滞后现象。

#### 4.3 模式预报降水（QPF）与洪水预报的耦合

预见期内的降水量直接影响着洪水预报的精度，预见期愈长，预见期内的降雨对预报值影响愈大，为此预见期内的降雨与洪水预报耦合技术也逐步受到了广大水文和气象科技工作者的关注。目前随着数值预报理论与方法的飞跃发展，数值预报现正成为暴雨预报实现定点、定时和定量的科学手段，为水文模型预见期降水的预报提供了强有力的支撑。

目前定量降水预报（QPF）应用于水文预报模型是被水文气象学界普遍认同的发展方向之一，也是目前研究的热点难点。对于预见期降雨与洪水预报耦合的研究国外相关学者以及国家气象中心、长江委、黄河委和武汉大学已开展过相关试验和调研：美国国家

气象中心(NMC)基于数值模式预报降水开发了一系列洪水量化预报法<sup>[34]</sup>;杨文发等<sup>[35]</sup>考虑预见期内的降水预报信息,采用降水预报与洪水预报耦合的方法,对1998年汛期发生在长江上游三峡区间的一次暴雨洪水过程进行了预报试验;王庆斋等<sup>[36]</sup>利用小浪底—花园口之间的暴雨洪水过程开展了洪水预报耦合技术研究;李超群等<sup>[37]</sup>基于短期定量降水预报产品开展了清江隔河岩洪水预报的研究;郭靖等<sup>[38]</sup>耦合MM5气象模式和VIC分布式水文模型构建了汉江流域水文气象耦合模型,并对丹江口以上流域开展模拟试验;Bao等<sup>[39]</sup>以淮河息县流域为试验流域,以CMC、CMA、ECWMF、UKMO、NCEP五个气象中心的TIGGE降水以及地面雨量计观测降水驱动新安江水文模型,在2007年7月的息县流域超警洪水预报中进行试验研究。崔春光等<sup>[40]</sup>、彭涛等<sup>[41]</sup>开展了定量降水预报及其集合预报产品与水文预报耦合的预报试验,结果表明考虑预见期内的降雨相对于未考虑预见期降雨对洪水预报结果提高具有明显的优势,能延长水文预见期,提高水文预报精度,约40%(图2);将降水集合预报

产品引入水文预报领域,拓展了水文不确定性预报的新方法,能将单一的确定性预报转化为可能发生范围的预报,获取更多的水文预报信息,提高了水文预报结果的可靠性,能更好地满足防洪减灾对风险信息的需求。

## 5 流域洪水实时预报系统研发及业务应用进展

洪水预报系统(flood forecasting system)是在计算机上实现洪水预报联机作业的运行系统,它靠快速、准确地收集、存储和处理水情、雨情,通过各种专业数学模型进行洪水预报,从而及时、准确地作出洪水流量过程的预报,提高了洪水预报的时效性和精确度。

在国外,最早将水情信息处理与洪水预报计算机制作直接联为一体的系统是从研制水文自动遥测洪水警报、预报系统开始的。从20世纪50年代开始,日本、美国、法国、英国等相继在本国的河流研制出水文自动测报系统,并先后具有自动化洪水预报、自动警报功能。80年代后,这种技术走向成熟和普及。

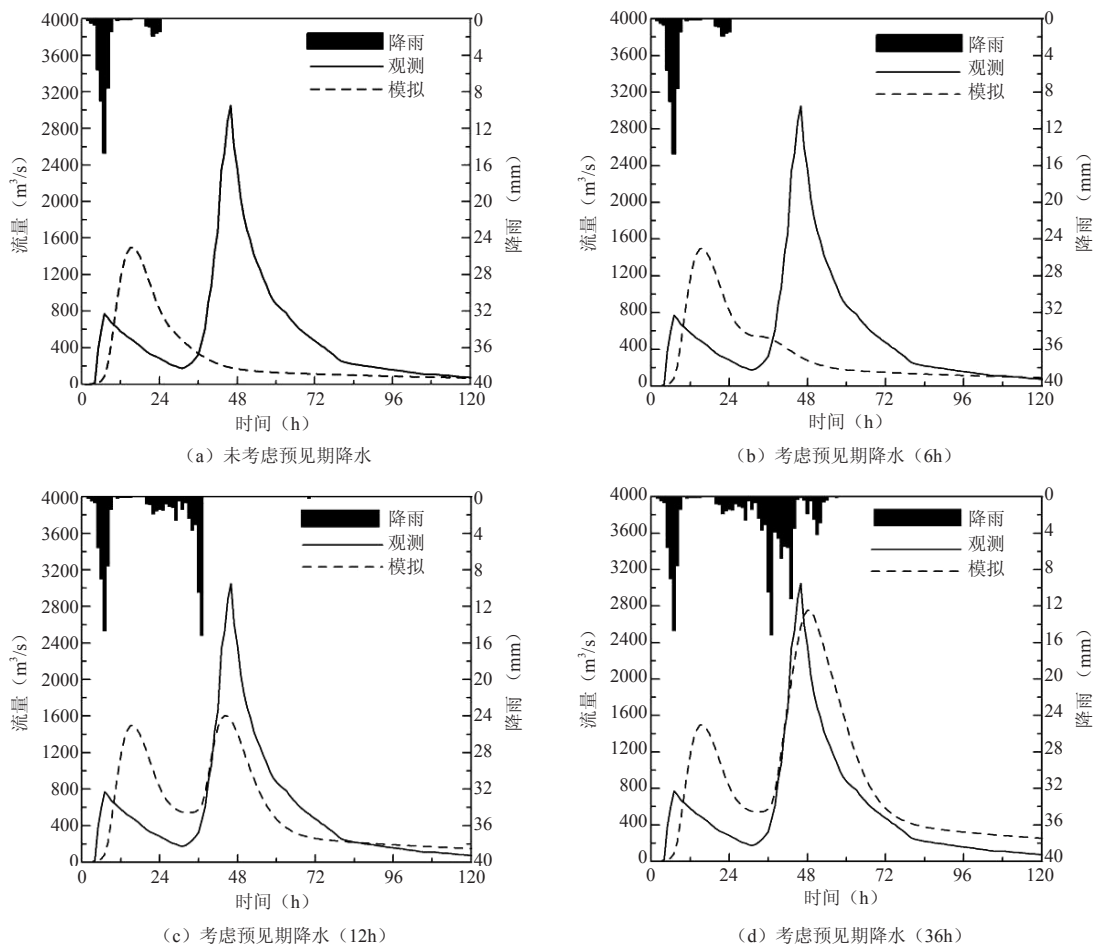


图2 定量降水预报与水文模型耦合的洪水预报

1989年,美国天气局在河流预报系统(NWSRFS)第5版上安装了交互式预报程序(IFP),揭开了新一代洪水预报系统研制的序幕。该系统采用完全模块化的结构,预报算法独立于计算机系统,利用图形交互处理技术对洪水预报数学模型的计算结果进行人工干预,从而得到可以发布和实行河系连续预报的成果,保证了河系预报作业连续性。至今,该系统已建成包含28个常用的预报模型的预报模型库,用户可任意选择所需模型用于构建预报方案,并在全美13个河流预报中心广泛使用。欧洲洪水预报系统(EFFS)在2003年3月于鹿特丹举行的题为“欧洲洪水预报的进步”的国际会议上进行了首次展示,目前改进后的系统可耦合雷达降水估算和有限区域数值天气预报模式,建立暴雨预报和洪水预报耦合的一体化模型<sup>[42-43]</sup>。

在我国,最早投入运行的洪水预报系统就是1985年从美国SM公司引进的ALERT软件系统。在消化吸收的基础上,我国开发了各流域的数以百计的洪水预报系统,至20世纪90年代中期,我国从无到有基本上普及了洪水预报系统,实现了以电脑作业替代手工作业。1992年,在中美双边洪水预报学术讨论会上,美国天气局河流预报系统(NWSRFS)第五版受到国内水文预报界的重视。当前,洪水预报系统研制进展较快,已开发了具有中国特色的专家交互式洪水预报系统。水利部水文局开发的“中国洪水预报系统”(CNFFS)和长江委水文局开发的“WIS水文预报平台”(WISHFS)便是代表性的成果。中国洪水预报系统采用C/S结构,以全国统一的实时水情数据库为依托,以地理信息系统为平台,能方便地构建五类洪水预报方案,具有标准的、通用的预报模型方法库,可任意选择多模型、多方法制定预报方案,具有人工和自动优选结合的模型率定功能,具有定时预报和人机交互预报功能,可干预任何信息源和预报过程,具有全面完善的系统管理功能等,已在25个流域机构和省(直辖市、自治区)的水文部门推广应用<sup>[43-44]</sup>。

随着现代气象业务的发展,国家气象中心、武汉暴雨所等单位立足于基于定量降雨估算(QPE)、定量降雨预报(QPF)、集合降水预报技术、开展水文预报模型和水文气象耦合的实时洪水预报技术研发,设计研发了融合多源降水信息的小流域分布式水文物理模型,流域水文气象实时预报系统,并实现了与气象信息综合分析处理系统(MICAPS)有机融合,成功应用于三峡库区、淮河王家坝、清江水布垭等12个流域以及国家山洪地质灾害防治气象保障工程项目中<sup>[45-46]</sup>。

## 6 展望

暴雨洪涝灾害一直是威胁人类生存和发展的最严重的自然灾害之一。然而当前客观条件正在悄然发生一些变化,如新一代天气雷达网的建成、雷达卫星估算降雨技术的发展脚步加快、定量降雨预报准确率的不断提高、水文模型构建技术的不断创新、地理信息技术的逐渐成熟、网络通信与计算机技术的飞速发展等,都给我国洪水预警预报技术发展提供了一个很坚实的基础和发展机遇,但是同时也面临着问题与挑战。笔者认为,为了进一步推动我国流域洪水预报技术的发展与应用,需在以下几个方面着重开展研究。

(1) 加强洪水预报与气象预报的集成耦合的技术研究,充分利用雷达探测技术以及中尺度暴雨预报技术来描述水文输入资料(降雨等)的时空变异性,并通过开展降尺度方法研究,逐步缩小气象与水文之间在时空尺度差异性问题的。

(2) 加强有物理基础的分布式水文模拟技术的应用研究。利用GIS技术,根据DEM自动提取各种水文地形特征,自动生成河网,进行流域产汇流和河道汇流计算;利用数字遥感数据提供基础性的流域下垫面信息,修正模型参数和状态变量值;在气象预报预报产品的基础上,利用分布式水文模型,进行洪水预报水文模拟计算,提高洪水预报精度。

(3) 暴雨洪水灾害是涉及自然、社会、经济等众多因素,为达到有效的抗洪救灾的目的,应加强洪水风险灾害评价技术的研究,准确合理的构建洪水灾害评价指标体系和洪水灾害风险评估模型,减少洪水灾害损失。

### 参考文献

- [1] 长江水利委员会. 水文预报方法(第二版). 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [2] 国家科委全国重大自然灾害综合研究组. 中国重大自然灾害及减灾对策(总论). 北京: 科学出版社, 1994.
- [3] 陈金荣, 罗伯昆. 对水文气象预报的认识和实践. 人民长江, 1982(6): 52-59.
- [4] 彭涛, 张利平, 沈铁元, 等. 现代水文气象预报技术研究进展. 人民黄河, 2010, 32(9): 29-32.
- [5] 杨扬, 张建云, 戚建国, 等. 雷达测雨及其在水文应用中的回顾及展望. 水科学进展, 2003, 11(1): 92-98.
- [6] Hudlow M D. 下一代天气雷达在水文中的初步应用和未来方向 // 第二次中美水文情报预报研讨会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.
- [7] 万玉发, 吴翠红, 金鸿祥. 基于准同雨团样本概念雷达和雨量计的实时同步结合方法. 气象学报, 2008, 66(1): 262-273.
- [8] 尹忠海, 张沛源. 利用卡尔曼滤波校准方法估算区域降水量. 应用气象学报, 2005, 16(2): 213-219.
- [9] 李建通, 杨维生. 提高最优插值法测量区域降水量精度的探讨. 大气科学, 2000, 24(2): 263-270.
- [10] 刘晓阳, 毛节泰, 李纪人. 雷达联合雨量计估测降水模拟水库入库流量. 水利学报, 2002(4): 51-55.
- [11] 张亚萍, 程明虎, 等. 天气雷达回波运动场估测及其在降水临近预报中的应用. 气象学报, 2006, 64(5): 631-646.

- [12] 宇如聪, 薛纪善, 徐幼平. AREMS中尺度暴雨数值预报模式系统. 北京: 气象出版社, 2004.
- [13] 徐幼平. 载水数值模式的实时预报试验. 应用气象学报, 1996(7): 257-266.
- [14] 王晨稀, 端义宏. 短期集合预报技术在梅雨降水预报中的试验研究. 应用气象学报, 2003, 14(1): 69-78.
- [15] 李俊, 廖移山, 张兵, 等. 集合数值预报方法在山洪预报中的初步应用. 高原气象, 2007, 23(4): 854-861.
- [16] 郭太英. 基于DEM的分布式水文模型的研究与应用. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [17] 芮孝芳, 黄国如. 分布式水文模型现状与未来. 水利水电科技进展, 2004, 24(2): 55-58.
- [18] 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等. 分布式流域水文模型原理与实践. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [19] Freeze R A, Hanlan R L. Blueprint for a physical-based, digitally simulated, hydrologic response model. Journal of Hydrology, 1969, 9: 237-258.
- [20] 沈晓东, 王腊春. 基于栅格数据的流域降雨径流模型. 地理学报, 1995, 50(3): 264-271.
- [21] 郭生练, 熊立华, 杨井, 等. 基于DEM的分布式流域水文物理模型. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(6): 1-5.
- [22] 任立良, 刘新仁. 流域数字水文模型研究. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(4): 1-7.
- [23] 郑红星, 刘昌明, 王中根, 等. 黄河典型流域分布式水文过程模拟. 地理研究, 2004, 23(4): 447-454.
- [24] 刘勇, 邹松兵. 祁连山地区高分辨率气温降水量分布模型. 兰州大学学报(S), 2006, 42(1): 7-12.
- [25] 邓伟涛. 利用CAM-RegCM嵌套模式预测我国夏季降水异常. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
- [26] 殷志远, 赖安伟, 公颖, 等. 气象水文耦合中降尺度方法研究进展. 暴雨灾害, 2010, 29(1): 89-95.
- [27] 刘黎平, 钱永甫, 王致君. 双线偏振雷达在水文预报领域的应用—实时水文预报系统的研制. 高原气象, 1996, 15(4): 508-514.
- [28] 刘晓阳, 毛节泰, 等. 雷达估测降水模拟史灌河流域径流. 北京大学学报(S), 2002, 38(3): 342-349.
- [29] Ren L L, Li C H, Wang M R. Application of radar-measured rain data in hydrological processes modeling during intensified observation period of HUBEX. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(2): 205-212.
- [30] Chen Y B, Hu J Q, Yu J. A flash flood forecast model for the Three Gorges Basin using GIS and remote sensing data. In: Weather Radar Information and Distributed Hydrological Modeling. Proceedings of symposium HS03 held during IUGG2003 at Sapporo, July 2003. IAHS Publ, 2003.
- [31] 李致家, 刘金涛, 等. 雷达估测降雨与水文模型的耦合在洪水预报中的应用. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 601-606.
- [32] 彭涛, 宋星原, 殷志远, 等. 雷达定量估算降水在水文模式汛期洪水预报中的应用试验. 气象, 2010, 36(12): 50-55.
- [33] 张利平, 张晓琳, 徐霞, 等. 基于水文模型的雷达监测降雨量误差传递研究. 水文, 2012, 32(1): 13-17.
- [34] 《长江防洪系统实时调度研究》编辑委员会. 长江防洪系统实时调度研究. 北京: 中国水利电力出版社, 1997.
- [35] 杨文发, 李春龙. 降水预报与洪水预报耦合应用初探. 水资源调查, 2003, 24(1): 38-40.
- [36] 王庆斋等. 黄河小花间暴雨洪水预报耦合技术研究. 人民黄河, 2003, 25(2): 17-19.
- [37] 李超群, 郭生练, 张洪刚. 基于短期定量降水预报的隔河岩洪水预报研究. 水电能源科学, 2006, 24(4): 31-35.
- [38] 郭靖, 郭生练, 张俊, 等. 汉江流域未来降水径流预测分析研究. 水文, 2009, 29(5): 18-22.
- [39] Bao H J, Zhao L N, He Y. Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-XINANJIANG model for flood forecast. Advances in Geosciences, 2011, 29(6): 61-67.
- [40] 崔春光, 彭涛, 沈铁元, 等. 定量降水预报与水文模型耦合的中小流域汛期洪水预报试验. 气象, 2010, 36(12): 56-61.
- [41] 彭涛, 李俊, 殷志远, 等. 基于集合降水预报产品的汛期洪水预报试验. 暴雨灾害, 2010, 29(3): 274-278.
- [42] “欧洲洪水预测系统”计划简介. 水利电力科技. 2003, 29(1): 43.
- [43] 陈捍华, 李培蕾. 流域洪水预报系统及其关键问题研究. 水利科技与经济, 2005, 11(2): 93-96.
- [44] 刘志雨. 我国洪水预报技术研究进展与展望. 中国防汛抗旱, 2009(5): 13-16.
- [45] Peng T, Wei, C Z, Ye J T, et al. Basin hydrometeorology real-time forecast system. Information Computing and Applications, 2012, CCIS307: 665-671.
- [46] 彭涛, 位承志, 叶金桃, 等. 汉江丹江口流域水文气象预报系统. 应用气象学报, 2014, 25(1): 112-119.

## 《全国基层气象台站简史》(套书)全部出版

白凌燕

在2014年新春到来之际, 由全国各基层气象台站五千余人参与编写、历时五年、总字数达二千四百多万字的《全国基层气象台站简史》(31本)已全部面市。《全国基层气象台站简史》每省一本, 开篇是全省气象台站概况(包括: 部门概述、本省天气气候特点及气象灾害防御情况、省级主要气象业务以及全省基层气象台站的类型分布及概况等), 之后分为两个层次写每个地市级气象事业的发展变化。首层是地级市的气象台站概况(包括: 市级气象工作基本情况和主要业务范围); 第二层是地市级及本市所辖各个区县级气象台站的历史

沿革、气象业务与服务、法规建设、气象文化建设、台站建设等情况, 同时配有大量台站面貌变化对比以及现代化建设现状的图片。此书纵观新中国成立60年来气象事业的发展历史; 横观不同地区、不同地域、不同天气条件下气象业务的发展状况; 总览新中国气象事业的管理体制、机构设置及人员队伍的发展变化以及气象法律法规逐步建立健全的发展过程, 是一套具有留存价值的史料图书。

(作者单位: 气象出版社)

